

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Année Scolaire 1921-1922 — N° 112

Travail du Laboratoire de Physique Biologique et d'Electro-Radiologie

RECHERCHES SUR LES COURANTS D'ACTION CHEZ L'HOMME

ELECTROMYOGRAMME NORMAL ET PATHOLOGIQUE

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Et soutenue publiquement le 26 Mai 1922

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

PAR

Théodore KOFMAN

Né le 21 Octobre 1889, à Odessa (Russie)

Préparateur de Physique Biologique à la Faculté de Médecine de Lyon

Interne suppléant des Hôpitaux de Lyon

Licencié ès Sciences — Licencié en Droit



LYON

IMPRIMERIE L. BASCOU

42-44, Rue Sala, 42-44

—
Mai 1922

Travail du Laboratoire de Physique Biologique et d'Electro-Radiologie

Recherches sur les Courants d'Action chez l'Homme

ELECTROMYOGRAMME NORMAL
ET PATHOLOGIQUE

DU MÊME AUTEUR

- Quelques cas de R. D. incomplète* (en collaboration avec le P^r CLUZET). C. R. du rapport de physioth. de la XIV^e Rég.
- Action du Radium sur l'oxyhémoglobine et sur les hématies* (en collaboration avec le P^r CLUZET et M. CHEVALIER). C. R. S. Biologie, 6 mars 1920.
- Action bactéricide du Radium sur le bacille pyocyanique* (en collaboration avec le P^r CLUZET et P^r ROCHAIX). C. R. S. Biologie, 10 juillet 1920.
- Action bactéricide du Radium sur le bacille pyocyanique* (en collaboration avec le P^r CLUZET et P^r ROCHAIX). C. R. S. Biologie, 15 novembre 1920.
- Action bactéricide du Radium sur le b. d'Eberth. Variations de la dose bactéricide* (en collaboration avec le P^r CLUZET et P^r ROCHAIX). C. R. Soc. Biologie, 20 déc. 1920.
- Spectre ultra-violet des pigments du b. pyocyanique* (en collaboration avec le P^r CLUZET et P^r ROCHAIX). C. R. S. Biologie, 21 février 1921.
- Action bactéricide du rayonnement que donnent les tubes radi-fères employés en radiumthérapie* (en collaboration avec le P^r CLUZET et P^r ROCHAIX). C. R. Académis des Sciences, 3 janvier 1921.
- Sur la production des rayons secondaires et sur leur utilisation* (en collaboration avec le P^r CLUZET). Mémoire du Journal de Radiologie et d'Electrologie, juillet 1921.
- Contribution à l'étude spectrophotographique des pigments du bacille pyocyanique* (en collaboration avec le P^r CLUZET et P^r ROCHAIX). Mémoire du Journal de Physiologie et de Path. génér., t. XIX, n° 3.
- Etude ultra-microscopique de l'action des rayons X sur les colloïdes métalliques* (en collaboration avec le P^r CLUZET). C. R. S. Biologie, 19 décembre 1921.
- Les électromyogrammes et possibilité de leur utilisation en clinique* (en collaboration avec le P^r CLUZET). Soc. Méd. Hôpitaux de Lyon, 23 février 1922.
- Le Réflexomètre pupillaire. Présentation de l'appareil* (en collaboration avec M. BUJADOUX). C. R. S. Biologie.
- Les résultats de la réflexomotrie dans l'étude du réflexe photomoteur normal* (en collaboration avec M. BUJADOUX). C. R. Soc. Biologie.

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Année Scolaire 1921-1922 — N° 112

Travail du Laboratoire de Physique Biologique et d'Electro-Radiologie

RECHERCHES SUR LES COURANTS D'ACTION CHEZ L'HOMME

ELECTROMYOGRAMME NORMAL ET PATHOLOGIQUE

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

Et soutenue publiquement le 26 Mai 1922

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

PAR

Théodore KOFMAN

Né le 21 Octobre 1889, à Odessa (Russie)

Préparateur de Physique Biologique à la Faculté de Médecine de Lyon

Interne suppléant des Hôpitaux de Lyon

Licencié ès Sciences — Licencié en Droit



LYON

IMPRIMERIE L. BASCOU

42-41, Rue Sala, 42-44

Mai 1922

PERSONNEL DE LA FACULTÉ

Doyen honoraire : M. HUGOUNENQ

Doyen MM. J. LÉPINE.
Assesseur ROQUE.

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. AUGAGNEUR, CAZENEUVE, BEAUVISAGE,
LACASSAGNE, TESTUT.

PROFESSEURS

Cliniques médicales.	}	MM. TEISSIER. ROQUE. BARD. TIXIER. BÉRARD. COMMANDEUR, ROLLET. NICOLAS. LÉPINE (J). WEILL. POLLOSSON (A). LANNOIS. ROCHET. NOVÉ JOSSEBRAND CLUZET. HUGOUNENQ. MOREL. MOREAU. GUIART. LATARJET. POLICARD. DOYON. COLLET. MOURIQUAND. PAVIOT. VILLARD. ARLOING (F.) MARTIN (Etienne). COURMONT (P.). PIC. FLORENCE (A.).
Cliniques chirurgicales		
Clinique obstétricale et Accouchements.		
Clinique ophtalmologique		
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques.		
Clinique neurologique et psychiatrique.		
Clinique des maladies des enfants.		
Clinique des maladies des femmes.		
Clinique d'oto-rhino-laryngologie.		
Clinique des maladies des voies urinaires.		
Clinique chirurgicale, infantile et orthopédie		
Physique biologique, Radiologie et Physiothérapie		
Chimie biologique et médicale.		
Chimie organique et Toxicologie		
Matière médicale et Botanique		
Parasitologie et Histoire naturelle médicale.		
Anatomie		
Histologie.		
Physiologie		
Pathologie interne.		
Pathologie et Thérapeutiques générales		
Anatomie pathologique		
Chirurgie opératoire		
Médecine expérimentale et comparée et Bactériologie.		
Médecine légale		
Hygiène		
Thérapeutique, Hydrologie et Climatologie.		
Pharmacologie		

PROFESSEURS TITULAIRES SANS CHAIRE

Chargé d'un cours de Pathologie externe	VALLAS.
— Propédeutique de gynécologie	CONDAMIN.
— Chimie minérale	BARRAL.
— Urologie	GAYET.

CHARGÉS DE COURS COMPLÉMENTAIRES

Anatomie topographique	PATEL.
Botanique	BRETIN.
Embryologie.	HOVELACQUE
Orthopédie	LARHYENNE
Puériculture et Hygiène de la première enfance	CHATIN
Stomatologie	TELLIER.

AGRÉGÉS

MM.	MM.	MM.	MM.
NOGIER	GARIN	DUROUX	CORDIER
BRETIN	SAVY	HOVELACQUE	ROUBIER
LERICHE	FROMENT	TRILLAT	FAVRE
THÉVENOT (Léon)	THEVENOT (Lucien)	SARVONAT	MURARD
TAVERNIER	PIERY	FLORENCE (G.)	BONNET
CADE	COTTE	ROCHAIX	GRAVIER, chargé des fonctions.

M. BAYLE, *Secrétaire*.

EXAMINATEURS DE LA THÈSE

MM. CLUZET, *Président* ; LÉPINE, *Assesseur* ;
MM. FROMENT et SARVONAT, *Agrégés*.

La Faculté de Médecine de Lyon déclare que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle n'entend leur donner ni approbation ni improbation.

A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

En témoignage de ma profonde reconnaissance.

A MA SŒUR ET A MON FRÈRE

En témoignage de la solide affection qui nous unit.

A MON COUSIN

LE DOCTEUR S. KOFMAN

Hommage reconnaissant

A MON COUSIN

PHILIPPE BARRAL

Mon meilleur Ami

A MES PARENTS ET AMIS

A MA TANTE
MADAME LA DOCTORESSE BARRAL

et A MON ONCLE
MONSIEUR LE PROFESSEUR BARRAL
Chevalier de la Légion d'Honneur

Bien faible témoignage de ma très vive affection
et de mon infinie reconnaissance pour leur
inlassable dévouement.

A NOTRE MAITRE ET PRÉSIDENT DE THÈSE

MONSIEUR LE PROFESSEUR CLUZET

Chevalier de la Légion d'Honneur

Nous le remercions de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence de notre thèse et de toute la bienveillance qu'il nous a témoignée au cours des dix années passées dans son laboratoire.

Nous le prions d'agréer l'hommage de ce travail qui fut élaboré sous sa direction. Nous l'assurons de notre profonde reconnaissance et le remercions sincèrement des témoignages de son amitié.

A NOS MAITRES DE LA FACULTÉ DES SCIENCES

A NOS MAITRES DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

(Laboratoire de Physique Biologique)

Nous les remercions pour les conseils et la bienveillante sympathie qu'ils nous ont toujours témoignée.

MONSIEUR LE PROFESSEUR CLUZET

MONSIEUR LE PROFESSEUR AGRÉGÉ NOGIER

MONSIEUR LE DOCTEUR CHANOZ, Chef des travaux

Nous assurons

M. LE PROFESSEUR AGRÉGÉ ROCHAIX

de notre sympathie et de notre reconnaissance.

A NOS MAÎTRES DANS LES HÔPITAUX

Stage :

M. LE PROFESSEUR TEISSIER

M. LE PROFESSEUR JABOULAY (*in memoriam*)

Services Hospitaliers :

M. LE PROFESSEUR NOVÉ-JOSSERAND

M. LE PROFESSEUR NICOLAS

M. LE DOCTEUR BARJON, Médecin des Hôpitaux

M. LE DOCTEUR PEHU, Médecin des Hôpitaux

M. LE PROFESSEUR PAVIOT

M. LE DOCTEUR FROMENT, Agrégé, Médecin des Hôpitaux

M. LE DOCTEUR GALLAVARDIN, Médecin des Hôpitaux

M. LE DOCTEUR BOUCHUT, Médecin des Hôpitaux

Recherches sur les Courants d'Action chez l'Homme

ELECTROMYOGRAMME NORMAL
ET PATHOLOGIQUE

INTRODUCTION

Des expériences déjà anciennes de Dubois-Reymond ont montré que lors de la contraction volontaire des muscles chez l'homme, des forces électromotrices se produisent dans ces tissus ; on donne à ces processus électriques indifféremment les noms de courant d'action, de variation négative, d'oscillation négative.

Tous les physiologistes sont actuellement d'accord pour admettre l'existence de tels phénomènes certainement très importants puisqu'ils sont en rapport avec l'activité musculaire et peut-être même, comme nous essayerons de le montrer plus loin, avec les excitations venues des centres nerveux.

Des problèmes du plus haut intérêt, non seulement biologiques mais pratiques, surgissent à l'occasion de

ces manifestations électriques; cependant, il n'est pas toujours possible de les résoudre dans l'état actuel de nos connaissances.

Quelle est l'origine de ces courants d'action ? Où se forment-ils ? Quel est le moment précis de leur apparition ? Comment les recueillir chez l'homme à travers la peau et les glandes ? Comment surtout interpréter les résultats enregistrés ? Autant de questions décevantes par leur complexité et auxquelles on ne peut souvent apporter qu'une réponse incomplète mais dont l'imprécision paraît bien naturelle si l'on songe que les acquisitions en électrophysiologie ne reflètent que les progrès si péniblement réalisés dans le domaine des sciences plus exactes.

Aussi nous diviserons cette étude en deux parties : Dans une première partie, nous exposerons, à la lumière des conceptions physico-chimiques les plus récentes, la genèse du potentiel électrique dans les muscles et la technique de l'enregistrement des courants d'action à l'aide du galvanomètre à corde.

Dans la seconde partie, nous envisagerons, avec les diverses interprétations de l'électromyogramme, leur étude physiopathologique et leur application dans le domaine clinique.

PREMIÈRE PARTIE

ORIGINE DU POTENTIEL ÉLECTRIQUE DANS LES MUSCLES

CHAPITRE PREMIER

Théories Electro-Biologiques

Avec le développement de nos connaissances en électricité, diverses théories électro-biologiques se firent jour. Aussi, après les avoir exposées chronologiquement, nous nous inspirerons des dernières acquisitions physico-chimiques pour tâcher de nous faire une représentation aussi claire que possible du processus électrique dans les muscles.

I. — Théorie électro-moléculaire de Dubois-Reymond.

— D'après Dubois-Reymond tous les tissus possédant des propriétés électromotrices et en particulier le tissu musculaire, seraient composés de molécules séparées dont chacune présenterait deux polarités, l'une positive, l'autre négative. Ces éléments, grâce à leur orientation, permettent de concevoir l'existence de courants de

repos et, en subissant une disposition différente, nous expliquent la naissance des courants observés pendant la période d'activité ou de contraction des tissus.

Cette théorie a sans doute le mérite d'être une première tentative de groupement de faits, mais malheureusement elle ne s'appuie sur aucune base positive.

Nous ne connaissons pas, en effet, d'expérience établissant que les corps vivants se distinguent des tissus inertes par une modalité spéciale de l'arrangement de leurs molécules.

II. — **Théorie de « l'altération » de Hermann.** — Pour l'école d'Hermann, seuls les tissus préalablement lésés sont le siège de forces électromotrices. Hermann montre, en effet, que si son maître Dubois-Reymond a observé un courant, celui-ci ne serait dû qu'à l'altération inévitable provoquée par la mutilation des tissus. Mais là encore, nous sommes loin d'une explication satisfaisante.

Hermann ne se borne à la vérité qu'à une simple description des faits, en énonçant : « Sur un muscle lésé, la section se comporte négativement par rapport à la surface longitudinale », mais il ne fait aucune hypothèse sur l'origine même de cette polarisation. Sa théorie n'est qu'un très fidèle compte rendu expérimental et n'indique pas pour quelle raison il attribue à la couche mourante une action électromotrice particulière. Du reste, les termes d'électronégativité ou d'électropositivité sont ambigus et il est aussi bien permis d'affirmer que la section transversale du muscle est électropositive et sa surface longitudinale électronégative, si au lieu de prendre en considération la direction du courant

dérivé on prend celui du courant qui prend naissance dans le muscle lui-même.

En somme, l'hypothèse d'Hermann manque de clarté autant que celle de son maître Dubois-Reymond.

III. — **Théories ioniques.** — Il faut arriver aux recherches faites dans le domaine physico-chimique pour avoir une conception plus rationnelle du courant d'action dans les muscles.

En connaissant mieux les différentes modalités de l'action des électrolytes dans les solutions, en déterminant plus exactement la mobilité des différents ions et en présentant enfin une théorie satisfaisante des différentes piles, on est arrivé progressivement à une interprétation plus vraisemblable des processus électro-biologiques.

Ostwald fut certainement le promoteur de l'hypothèse établissant que les phénomènes électriques observés dans les tissus sont probablement sous la dépendance des différences de concentration des divers électrolytes.

Nernst reprenant à son compte cette conception et se fondant sur l'inégale mobilité des ions propose le schéma suivant de l'électrogenèse en général :

Deux forces interviennent dans le déplacement des ions, la poussée osmotique et le champ électrostatique engendré par l'inégale vitesse des deux ions de l'électrolyte.

Ce qui peut être exprimé par la relation :

$$\text{Force électromotrice} = \frac{u - v}{u + v} RT \log. \frac{C_1}{C_2}$$

u et v étant les vitesses respectives du cation et de l'anion ; c^1 et c^2 étant les concentrations des deux solutions.

L'utilisation de ces données dans le domaine biologique, en particulier pour l'explication du courant d'action, fut très féconde et, avec les progrès ultérieurs de l'électrochimie comme de la physique capillaire, on assiste au développement de deux principales théories, l'une connue sous le nom de théorie des communications asymétriques et l'autre de théorie des membranes.

A. — *Théorie des communications asymétriques.* —

Czagowec puis Cybulski, dans une série de travaux publiés surtout en Russie et en Autriche, admettent que dans les tissus et en particulier dans les muscles, existent des conditions favorables à la production des piles liquides et que la substance qui serait la cause de ce courant pourrait être l'acide carbonique. On sait en effet que CO^2H^2 se forme aussi bien pendant l'activité des tissus que pendant leur mort. Or, après section d'un muscle, on assiste à son processus de destruction et par suite, à la production de CO^2H^2 et surtout à la diffusion de CO^2 et ce serait là l'origine de la force électromotrice. Plus récemment, Pauli attribue ce rôle non à l'anhydride carbonique, mais à la formation de l'acide lactique.

Notons que Cybulski, puis d'Arsonval, ont essayé d'expliquer ces phénomènes par des considérations électrocapillaires et ont construit des muscles artificiels avec lesquels ils espéraient reproduire les faits observés sur les muscles vivants. Cependant, si attrayants que semblent être toutes ces tentatives, il est difficile d'assimiler

le muscle uniquement à un complexe électrolytique à l'image des piles liquides. D'autres éléments, les substances albuminoïdes et notamment des membranes séparant plus ou moins ces électrolytes, peuvent jouer un rôle considérable dans la genèse de la force électromotrice.

B. — *Théorie des membranes ; leur semi-perméabilité.*

— Pour Tschagowetz, Bernstein, Bruning, l'importance des membranes dans la production du courant d'action est capitale.

Au premier abord, on pourrait croire qu'une membrane quelconque, animale ou végétale, séparant deux solutions d'inégale concentration, est inerte. Il n'en est rien ; cette cloison fonctionne comme un véritable crible laissant passer certains ions et arrêtant ou retardant le passage des ions portant une charge de signe contraire. Tout septum ou paroi serait donc le siège d'une force électromotrice appréciable.

Comment peut-on concevoir la genèse de cette polarité ?

L'explication du phénomène est très simple si l'on veut bien, à l'exemple de P. Girard, décomposer une membrane en une infinité de tubes capillaires parallèles et juxtaposés. Or, si on se rapporte aux résultats des recherches d'Helmoltz et de J. Perrin sur l'électrisation de contact des parois dans les tubes capillaires, on sait le rôle si important et presque exclusif que ces physiiciens attribuent aux ions H et OH probablement parce qu'ils sont les plus petits et les plus facilement adsorbables. Il nous est aisé dès lors, d'appliquer ces données

à l'ensemble des tubes capillaires qui physiquement constituent une membrane, et nous pouvons par suite admettre que tout septum situé en contact avec la solution la plus concentrée en ions H ou OH va fixer par adsorption les ions correspondants. Ainsi, si la solution la plus concentrée est acide, la membrane fixe surtout les ions H ; si la solution concentrée est alcaline, elle fixe les ions OH. Quant à la face de la membrane qui est en contact avec la solution diluée, elle se revêt en vertu du principe de la conservation de l'électricité, d'un même nombre de charges de signe inverse. Quoiqu'il en soit, le septum est polarisé et on conçoit que la différence de potentiel dont il est le siège puisse apporter une véritable perturbation dans les lois ordinaires de l'osmose et troubler la diffusion des anions et cations d'un même électrolyte.

Pour avoir une idée de cette force électromotrice on peut l'évaluer par l'expression suivante :

Supposons une membrane séparant par exemple deux solutions de NaCl de concentration respectivement c^1 et c^2 ($c^2 > c^1$).

Si P est la pression osmotique s'exerçant par unité de surface de la membrane, E la différence de potentiel existant entre les ions Na et Cl, q la quantité d'électricité correspondante à un gramme de Na, T la température absolue et enfin R la constante des gaz, nous avons la relation :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{RT}{q} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{1}{P}$$

$$\text{D'où } dE = \frac{RT}{q} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{dx}{P}$$

$$\text{et en intégrant : } E = \frac{R T}{q} \int_{p_2}^{p_1} \frac{dP}{dx} \frac{dx}{p} = \frac{R T}{q} \log . \frac{p_2}{p_1}$$

$$\text{ou } E = \frac{R T}{q} \log . \frac{C_2}{C_1}$$

Ainsi, grâce à ces données expérimentales et théoriques, les partisans de la théorie des membranes sont à même d'expliquer la production du courant d'action.

On peut supposer en effet, qu'au moment où le muscle est lésé, soit par une section, soit par une excitation, il se produit aussitôt une perturbation dans la polarisation de cette surface musculaire avec mise en branle d'électrolytes contenus dans le muscle. Il est fort probable que des dissociations moléculaires s'effectuent et les ions qui en résultent donnent naissance par leur diffusion à un champ électrique. Or, remarquons que les ions H, grâce à leur extrême petitesse et leur plus grande mobilité s'échappent de la région lésée avec une plus grande facilité que les ions négatifs qui sont retardés ou retenus dans la paroi. Dès lors, la portion lésée ou excitée du muscle va présenter une double couche électrique déterminée par les ions positifs qui ont tendance à s'échapper et les ions négatifs qui sont arrêtés.

C'est précisément cette différence de mobilité des ions qui provoque une certaine différence de potentiel électrique et l'apparition instantanée d'un courant. Les mêmes modifications ioniques se reproduisant de proche en proche nous expliquent la genèse d'un courant d'action de sens bien déterminé (première phase). Après le passage de ce courant, les différentes parties excitées entrent de nouveau au repos et il se forme également

une double couche constituée cette fois d'ions positifs sur la surface qui entre au repos et d'ions négatifs sur la partie lésée. Il en résulte un nouveau courant de sens contraire au précédent (deuxième phase).

IV. — **Théorie électronique.** — Avec une nouvelle conception de la constitution même de l'atome, on assiste à l'éclosion d'une théorie un peu différente de l'électrobiogénèse.

J.-J. Thomson, Rutherford, Bohr considèrent en effet un atome quelconque comme formé d'une sphère d'électricité positive autour de laquelle gravitent en se déplaçant, suivant des trajectoires fermées, de très petits corpuscules nommés électrons et chargés d'électricité négative. A l'aide de ce système, les physiciens contemporains firent beaucoup progresser notre connaissance de l'état solide. En particulier, tous les bons conducteurs d'électricité comme les métaux seraient caractérisés par la présence à leur surface d'un grand nombre d'électrons libres et animés d'une extrême mobilité.

Tel est le point de départ de la théorie électronique des métaux si fertile en conséquences et où la genèse du courant électrique est attribuée à la seule mobilisation de ces électrons. Or, par suite même du déplacement de ces particules électrisées, des perturbations électro-magnétiques se produisent tout autour du conducteur. Ce serait là l'origine de l'onde électrique, dont la vitesse de propagation est voisine de celle de la lumière. Ainsi, toute production du courant électrique résulte du transport d'électrons de la cathode vers l'anode et toute variation dans le cheminement de ces

électrons se traduit par la production de perturbations électro-magnétiques.

Si nous appliquons ces données en biologie avec toutes les réserves qu'elles doivent comporter, on peut concevoir l'ensemble formé par les cellules corticales, les nerfs moteurs et sensitifs comme un circuit électrique qui serait fermé par le tissu musculaire et constamment parcouru, même à l'état de repos par les électrons.

Dès lors, qu'un trouble quelconque survienne dans le déplacement de ces corpuscules, aussitôt une onde électro-magnétique se produit, avec mise en liberté d'une certaine quantité d'énergie. C'est la formation de cette onde qui serait le *primum* moyens du courant d'action des physiologistes.

V. — **Conclusions.** — Telles sont les principales hypothèses qui ont été émises pour expliquer l'origine des courants électriques, non seulement dans les muscles, mais dans tous les autres tissus de l'organisme.

De nombreuses considérations physico-chimiques semblent plaider en faveur de la théorie ionique ou électronique. Il serait cependant dangereux d'être exclusif. Sans doute, on peut admettre que la force électromotrice des courants bio-électriques est la somme algébrique, aussi bien des diverses transformations chimiques ou physiques, que des différences de potentiel créées au contact de liquides inégalement concentrés.

Mais il est prématuré encore d'avoir une opinion, devant la complexité des phénomènes intracellulaires et la constitution histologique si spéciale de la fibre musculaire. Ces réserves faites, il se dégage de l'ensem-

ble des travaux qu'il est impossible actuellement de dissocier l'excitation que reçoit un muscle du courant d'action que l'on enregistre et qu'en définitive, l'un des phénomènes est la traduction de l'autre, la variation négative n'étant qu'un signe révélateur d'une perturbation ionique ou électronique née quelque part dans l'organisme.

CHAPITRE II

Enregistrement du courant d'action musculaire Technique de l'Electromyogramme

I. — **Généralités.** — Si nous ne sommes réduits qu'à des hypothèses sur l'origine et la nature du courant d'action, il nous est possible cependant d'en enregistrer les variations.

Il est certain que pour le myocarde, et déjà depuis plusieurs années, grâce au galvanomètre d'Einthoven, la méthode électrocardiographique a acquis droit de cité en clinique et s'est rapidement vulgarisée. Aussi, est-on étonné de constater que le photogramme du courant d'action des autres muscles de l'organisme est presque entièrement ignoré malgré quelques travaux faits surtout à l'étranger. Sans vouloir mettre en parallèle l'électrocardiographie et l'électromyographie, cette dernière méthode présente pourtant un intérêt non seulement spéculatif mais physiopathologique, puisque certains auteurs ont su tirer de ce procédé un nouveau moyen d'analyse de l'innervation musculaire et pensent même pouvoir interroger la dynamique des centres nerveux. Nous ne nous permettrons pas de préjuger de l'exactitude de ces déductions, mais il nous semble utile d'exposer tout d'abord la technique avec les nombreuses

difficultés qu'elle comporte, puis la façon dont nous avons essayé de les résoudre.

Assurément, les écueils rencontrés pour l'enregistrement des courants d'action expliquent l'apparition tardive de la méthode électromyographique.

Pour fixer les idées, proposons-nous par exemple de recueillir le courant d'action des muscles fléchisseurs de l'avant-bras, groupe musculaire qui se prête très facilement à ce genre de recherche, car on peut aisément et au commandement, obtenir leur contraction volontaire. Aussitôt, nous sommes arrêtés dans l'exécution de l'expérience par le choix d'électrodes et d'un appareil enregistreur.

II. — **Choix d'électrodes.** — On pourrait songer pour recueillir le courant d'action musculaire, à utiliser les mêmes électrodes impolarisables liquides qui servent habituellement à l'électrocardiographie, mais ainsi que dans la première expérience de Dubois-Reymond, ce seront des variations électriques dues surtout au myocarde qu'on enregistrerait ainsi, et il serait difficile de faire le départ de ce qui appartient uniquement à la contraction du cœur d'avec celle des autres muscles.

M. le professeur Cluzet avait bien essayé de tourner élégamment la difficulté en étudiant, il y a quelques années, dans un travail, qui du reste n'a pas été publié, les modifications de l'électrocardiogramme chez des blessés atteints de contractures organiques ou fonctionnelles et chez des amputés d'un membre supérieur ou inférieur. Mais il échoua dans cette tentative, car la superposition constante du tracé électrique du myocarde

gène beaucoup l'interprétation. Force est donc de trouver un dispositif particulier permettant de dériver directement le courant d'action des muscles fléchisseurs.

On est redevable à Piper d'avoir employé le premier des électrodes impolarisables convenablement choisies, afin d'être placées à même la peau de l'avant-bras.

A la suite de ce physiologiste, nous avons construit, avec l'aide du mécanicien du laboratoire Bouvier, un modèle d'électrode constitué de la façon suivante :

Un récipient en verre de forme cylindrique est effilé à sa partie supérieure et élargi à sa base, dont le diamètre peut varier de deux à quatre centimètres. L'extré-

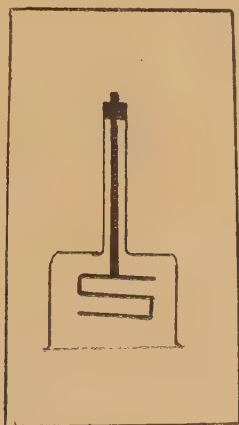


Fig. 1

mité supérieure est fermée par un bouchon de liège, le fond est obturé par une membrane de vessie de porc. Le récipient est entièrement rempli d'une solution saturée de SO_4Zn où plonge, comme l'indique la figure 1, une tige de Zn recourbée à sa partie inférieure et en relation par l'une de ses extrémités avec l'une des bornes du galvanomètre.

Ces électrodes présentent l'avantage d'être facilement localisables à des portions bien limitées de la surface musculaire à étudier. Mais, leur résistance étant relativement grande, l'amplitude des oscillations recueillies avec ce dispositif se trouve être très faible. Aussi, nous avons préféré nous servir d'une électrode plus simple et pouvant surtout être confectionnée rapidement, sans frais et sans outillage spécial.

Nous nous servons de deux tampons de gaze, l'un imbibé de sérum physiologique et placé au contact de la peau, l'autre appliqué au-dessus du précédent et imbibé d'une solution saturée de SO_4Zn ; enfin, recouvrant exactement les deux compresses, une plaque de zinc ayant une surface de quatre à six centimètres carrés se trouve en relation avec le galvanomètre. Tels sont les seuls éléments de ce conducteur impolarisable. La fixation des électrodes se fait très facilement à l'aide de bandes de toile ou de caoutchouc.

Remarquons que, dans ces conditions, on peut négliger les variations de résistance ohmique dues aux modifications de pression des électrodes; de même l'erreur due à la polarisation des électrodes ou aux oscillations produites par les mouvements involontaires est réduite au minimum et enfin, les courants d'action cutanéoglandulaires parasites sont d'un ordre de grandeur relativement trop faible pour influencer sensiblement sur la courbe obtenue (Piper).

III. — Conditions expérimentales pour l'enregistrement des courants d'action. — Nous avons utilisé, soit le galvanomètre à corde modèle Cambridge, soit celui

d'Edellmann. Chaque expérience était souvent répétée avec ces deux instruments pour nous bien convaincre qu'aucune cause extérieure ne pouvait entacher d'erreur nos résultats, par le choix de tel ou tel appareillage. Nous ne décrirons pas les instruments, mais nous nous attacherons surtout à préciser les conditions expérimentales où nous nous sommes placés pour avoir un meilleur rendement.

Il importe avant tout de noter, et ceci d'accord avec tous les auteurs, quelle que soit leur préférence théorique, que les indications du galvanomètre par son union avec un organe musculaire ou nerveux, ne sont en réalité que le résultat d'une dérivation d'un courant existant déjà dans ces tissus. Même à l'état de repos, ce courant existe, mais il est fermé d'une façon permanente au moyen de ce même tissu et cela indépendamment de l'origine de l'électrobiogénèse. Par conséquent, toute oscillation du galvanomètre nous avertit bien du passage d'un courant dans le muscle, mais il nous est impossible de dire « à priori » où a pris naissance cette force électromotrice. En effet, parmi tous les éléments tels que nerfs, plaques motrices, fibrilles musculaires, comment attribuer à l'un d'eux plutôt qu'à un autre le rôle d'organe formateur du courant d'action, puisque tous contribuent au même degré à la conduction de l'excitation ? Ce n'est, comme nous le verrons, qu'à la suite d'expériences convenablement choisies et encore loin d'être décisives, qu'on peut essayer de déterminer l'appareil tissulaire susceptible d'être mis en cause pour la production du courant d'action recueilli avec le galvanomètre.

Bien plus, alors même qu'on arriverait à préciser l'élément en question, il est certain que le galvanomètre n'indique pas la totalité de la force électromotrice du muscle considéré, mais seulement une partie, celle qui correspond à la chute de potentiel entre les deux électrodes. Quant à l'intensité de ce courant enregistré, elle va dépendre non seulement de cette force électromotrice mise en jeu, mais encore de la résistance du circuit formé par le galvanomètre et de tout le conducteur interne. D'où, comme principale conséquence pratique, le grand avantage que nous avons à éloigner le plus possible les deux électrodes l'une de l'autre, afin de recueillir dans le galvanomètre un courant dérivé le plus intense.

En outre, certains auteurs ont cru pouvoir soulever une grave objection leur permettant même de mettre en doute, malgré l'oscillation de la corde du galvanomètre, l'existence d'une force électromotrice quelconque dans le muscle.

Si l'on remarque en effet, que l'ensemble formé par la partie du corps humain et les deux électrodes qui lui sont appliquées par l'intermédiaire d'un mauvais conducteur tel que la peau constitue un système analogue à un condensateur, on peut admettre qu'à toute différence de potentiel apparue soudainement dans le circuit de l'organisme, la corde du galvanomètre située en dérivation par rapport au circuit interne constitué par le muscle, devra s'écarter de sa position d'équilibre beaucoup plus qu'elle ne le ferait sans l'interposition des tissus. C'est ce que l'on observe et il n'est pas dès lors irrationnel de supposer, comme ces auteurs le préten-

dent, que les oscillations du galvanomètre ne représenteraient en réalité que les diverses variations de résistance du muscle ou simplement les modifications de la conductibilité des tissus. D'après les recherches de Kolrausch et d'Einthoven, cette interprétation doit être écartée car on s'expliquerait mal comment après la disparition de la différence de potentiel, la corde atteint sa position d'équilibre après une phase périodique exactement semblable à celle qu'elle présentait au moment de l'apparition de la force électromotricée.

Quoiqu'il en soit, il est nécessaire de préciser la tension qu'on doit donner à la corde pour opérer dans les conditions toujours semblables.

Si nous nous rapportons aux travaux d'Einthoven, la sensibilité normale du galvanomètre à corde est exprimée par la relation :

$$(1) \quad E = \frac{a}{10 d t^2 I \sqrt{R}}$$

où a est l'écart en mm. de la corde, d la distance de l'échelle en mm. I l'intensité du courant en ampères, t la durée de la vibration complète en seconde et R la résistance intérieure du galvanomètre en ohms.

D'autre part, l'amortissement électromagnétique d'une corde de longueur l se déplaçant dans le champ magnétique H est donnée par la formule :

$$(2) \quad D = \frac{2 H^2 l^2}{3 R 10^9} = 4 \pi M N$$

Si M est la masse de la corde et N le nombre des oscillations de la corde par seconde.

En comparant les deux relations précédentes on voit

que pour un champ magnétique constant, la sensibilité de la corde dépend de l'épaisseur du fil oscillant, de sa tension et se trouve inversement proportionnel à ce dernier facteur. Ainsi, la période des oscillations diminue avec la tension du fil, de telle sorte que pour une forte tension (petite période d'oscillation, faible sensibilité) le mouvement peut devenir presque apériodique. Par contre, avec une grande sensibilité (faible tension, grande période), l'amortissement des oscillations est très faible.

Il importe donc de se placer dans les conditions expérimentales toujours comparables au point de vue de la tension donnée à la corde du galvanomètre; aussi, nous choisissons au préalable une tension intermédiaire telle qu'elle corresponde à la prise d'un électrocardiogramme ayant une oscillation d'amplitude moyenne, en plaçant d'abord chacune des électrodes sur la face antérieure de chacun des avant-bras.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE PHYSIO-PATHOLOGIQUE DES ELECTROMYOGRAMMES

CHAPITRE PREMIER

Electromyogramme normal

I. — Le photogramme électrique normal au cours du **tétanos volontaire**. — A l'aide du dispositif expérimental décrit dans le chapitre précédent et en tenant compte de toutes les conditions techniques inhérentes à la méthode même, nous avons la possibilité de recueillir les courants d'action de tout groupe musculaire et en particulier des fléchisseurs de l'avant-bras.

Ainsi, lors de la contraction volontaire des fléchisseurs de l'avant-bras, soit pendant un temps très court, soit pendant une durée prolongée, l'électromyogramme nous révèle une série d'oscillations diphasiques très soutenues et se propageant comme un train d'ondes. L'examen de ce tracé discontinu montre que l'amplitude de ces oscillations est peu différente d'un sujet à l'autre;

mais, ce qui les caractérise essentiellement, c'est leur fréquence. Nous avons trouvé que chez les sujets normaux, le nombre de ces variations diphasiques varie de 48 à 52 à la seconde. (Fig. 2; fig. 3 en amplifiant les

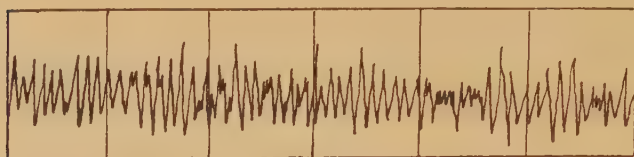


Fig. 2

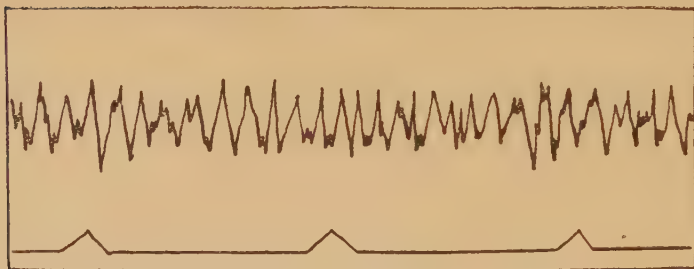


Fig. 3

tracés précédents ; le temps est de un cinquième de seconde).

II. — Interprétation de l'Electromyogramme (Théorie de Piper.) — Piper fut le premier à donner une analyse de la courbe électromyographique. La base de sa théorie repose sur l'hypothèse d'Hermann de l'existence de « l'équateur nerveux » situé, pour les fléchisseurs de l'avant-bras, à l'union du tiers supérieur et du tiers moyen de ce segment de membre. Partant de cette idée, Piper étudie l'effet d'une seule excitation faradique sur le nerf médian ou cubital au coude et il constate

que l'onde unique, diphasique enregistrée, est différente selon la place donnée aux électrodes à l'avant-bras. Ainsi, suivant que ces électrodes sont au-dessus ou au-dessous de l'équateur nerveux, l'onde diphasique a tantôt un clocher supérieur ou inférieur (Fig. 4, III et II).

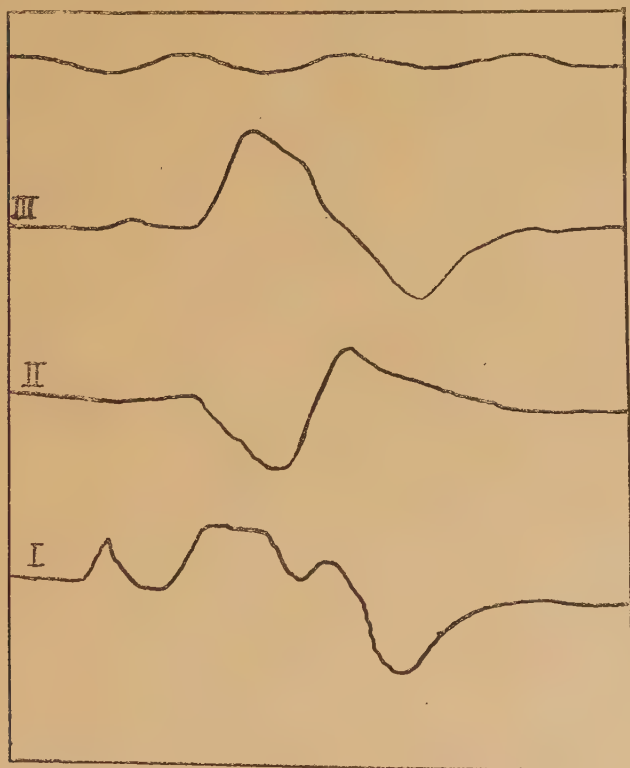


Fig 4

L'auteur explique ce résultat en admettant que l'onde musculaire (Kontraktionwelle), prenant son origine à l'équateur nerveux, fait naître dans les fibrilles musculaires un courant d'action qui se propage de là vers les

deux extrémités du muscle ; en passant sous les électrodes de dérivation, la variation diphasique enregistrée a un sens différent suivant la situation respective de ces électrodes par rapport à l'équateur nerveux. Au cas où les deux électrodes sont placées aux deux extrémités de l'avant-bras, la courbe de l'électromyogramme est plus complexe (Fifi. 4, I), mais pour l'auteur, ce résultat serait dû à l'interférence des deux ondes diphasiques nées, l'une à la partie supérieure de l'avant-bras et l'autre à la partie inférieure, c'est-à-dire de part et d'autre de l'équateur nerveux.

Du reste, il est possible de dissocier dans cette courbe pluriphasique deux ondulations simples, dont chacune correspond précisément au courant d'action propre qu'on aurait obtenu si les deux électrodes étaient placées de part et d'autre de l'équateur. De plus, par superposition des deux courbes partielles précédemment enregistrées, l'auteur arrive à faire la synthèse graphique de l'électromyogramme recueilli en dérivant le courant d'action aux deux extrémités de l'avant-bras.

Mais le fait remarquable, établi par Piper, est que chacune des oscillations qui apparaît au cours du tétanos volontaire, présente la même fréquence que celle qui correspond à la variation diphasique due à une excitation unique du courant faradique. Dans les deux cas, la fréquence serait de un cinquantième de seconde. Ce physiologiste conclue donc que, chacune des ondulations de la courbe du tétanos volontaire est équivalente, tant en durée qu'en amplitude, à celle enregistrée à la suite d'un seul choc induit portant sur le nerf moteur du muscle considéré. Donc, si on constate qu'au cours du

tétanos volontaire, le rythme est de 50 à la seconde, c'est que les fibres musculaires reçoivent 50 impulsions nerveuses pendant ce même temps. Ainsi, la théorie de « l'impulsion nerveuse » était créée.

La plupart des auteurs qui ont étudié l'électromyogramme, sont d'accord avec les idées de Piper et s'ils émettent certaines objections, c'est moins sur le fond que sur la valeur de certaines de ses conclusions.

Dittler et Garten trouvent que la fréquence des oscillations est supérieure à 50 ; en excitant le phrénique du chien, ces auteurs ont mis en évidence une fréquence des courants d'action du diaphragme atteignant 140. Fahrenkamp trouve un chiffre semblable par excitation réflexe du quadriceps crural d'un chien.

Dittler et Garten attribuent cette discordance entre les résultats obtenus par Piper, au degré plus ou moins grand de tension donné à la corde du galvanomètre. Kolrausch montre cependant que, si l'amplitude des oscillations diminue en tendant la corde, leur fréquence ne change pas.

Du reste à l'appui du rythme de 50, des expériences de Miss Buchanan avec l'électrocapillarimètre, puis celles de Wertheim-Salomonson semblent confirmer ces résultats.

Toutefois, dans des recherches ultérieures, Piper lui-même reconnaît qu'à côté de la fréquence exacte de 50 à la seconde, il existerait une autre fréquence qu'il nomme atypique, caractérisée par des clochers à plusieurs sommets et due vraisemblablement à l'interférence de plusieurs ondulations primitivement simples. Notons enfin que, la fréquence de un cinquantième de

seconde n'est pas générale pour tous les muscles de l'organisme; d'autres muscles, tels que le deltoïde, le masseter se distinguent par une fréquence différente.

III. — **Objections à l'interprétation de Piper.** — L'excitation électrique des nerfs moteurs de l'homme faite à travers la peau, selon le procédé de Piper, présente bien des écueils difficiles à éviter. En effet, il n'est pas du tout certain que le tracé qu'on obtient de cette sorte ne soit pas simplement l'enregistrement du courant dérivé exciteur.

Nous avons refait les expériences décrites par Piper en excitant le nerf médian ou cubital avec une faible onde faradique ; nous avons bien observé une ou plusieurs oscillations diphasiques, mais sans pouvoir affirmer si ces variations doivent être mises sur le compte du courant d'action musculaire ou du courant dérivé exciteur. En utilisant comme exciteur du nerf les décharges données par des condensateurs de très faible capacité, nous avons enregistré toute une série d'ondes oscillantes. C'est, qu'en effet, le galvanomètre n'a pas plusieurs manières de réagir aux forces électromotrices qui naissent dans son circuit et dès qu'on s'adresse à un agent extérieur pour provoquer l'excitation, il est très difficile d'éliminer « a priori », de l'ensemble des oscillations qui apparaissent, celles qui sont seulement dues au courant dérivé exciteur.

Il est vrai qu'Hoffmann a essayé d'obtenir un courant d'action du quadriceps crural, non plus par un choc induit, mais par percussion sur le tendon rotulien. Dans ces conditions, il a constaté que l'onde diphasique

recueillie possède toujours une fréquence analogue à chacune des oscillations de l'électromyogramme du tétanos volontaire de la cuisse. Mais là encore, et pour les mêmes raisons que plus haut, le résultat n'est pas absolument décisif. Si l'on songe, d'autre part, qu'il n'est pas toujours aisé de déchiffrer le tracé électromyographique, par suite de la présence de fréquentes oscillations secondaires, on est amené à conclure que l'explication de Piper et de son école est loin d'être très satisfaisante. Comment, de plus, se résigner à bâtir tout l'édifice expérimental, comme le fait ce physiologiste, sur la seule notion de l'équateur nerveux ? Rien n'est moins prouvé que l'existence de cette zone bien localisée, où le nerf aborderait le muscle car, contrairement à cette conception, il est reconnu aujourd'hui que c'est par un véritable bouquet de plaques terminales que les filets nerveux s'épanouissent dans tout le tissu musculaire. On ne peut ainsi accorder une réalité à la fiction commode proposée à l'origine par Hermann.

Ces considérations peuvent paraître sans intérêt et cependant, suivant qu'on les adopte ou qu'on les réfute, on arrive à des conclusions différentes sur le lieu et le moment de production du courant d'action et c'est l'interprétation même de l'électromyogramme qui est en jeu. En somme, la question qui se pose est la suivante : la variation négative est-elle fonction de la propagation de l'onde contractile ou, au contraire, précède-t-elle les manifestations mécaniques de la contraction ?

IV. — **Essai expérimental pour l'interprétation de l'électromyogramme.** — Nous ne connaissons actuellement que trois facteurs pouvant intervenir dans la tétanisation volontaire d'un muscle : l'excitation, le courant d'action, la contraction musculaire. Il est donc logique de penser qu'on ne peut arriver à une interprétation rationnelle de l'électromyogramme qu'en s'attachant à déterminer, avant tout, la situation exacte, dans l'espace et le temps, du courant d'action par rapport aux deux autres facteurs.

On est surpris de constater comment Piper, l'auteur de la théorie de l'impulsion nerveuse, est totalement en contradiction avec ses déductions, quand il prétend relier le processus électrique du courant d'action à la propagation de l'onde contractile. Dans son ouvrage fondamental, il s'exprime ainsi : « Si l'on obtient une variation diphasique, c'est qu'une onde de contraction (*kontraktionwelle*) a parcouru le muscle en atteignant d'abord l'une des électrodes, puis l'autre ». Or, ce physiologiste apporte, lui-même, des arguments en opposition avec cette conception. Comment s'expliquer, en effet, si la variation négative est liée à la vitesse de l'onde contractile, que la fréquence des oscillations soit indépendante de la distance séparant les deux électrodes et que, des muscles aussi différents de longueur, comme ceux de l'éminence thénar et les fléchisseurs de l'avant-bras, aient le même nombre d'oscillations ?

Nous avons réalisé, d'autre part, une série d'expériences qui semblent plaider contre l'hypothèse de Piper.

Expérience I. — Les deux électrodes sont placées au voisinage du présumé équateur nerveux et perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'avant-bras. D'après Piper, on n'aurait dû recueillir aucun courant d'action et cependant, nous avons pu mettre en évidence des oscillations diphasiques d'amplitude, certes diminuée, mais de fréquence égale à la normale (fig. 5).

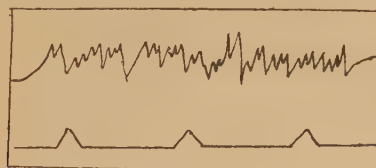


Fig. 5

Expérience II. — Au lieu de fixer les électrodes à la face antérieure de l'avant-bras, on les place à la face postérieure, au contact des muscles antagonistes ; on provoque la contraction des fléchisseurs, les muscles extenseurs étant au repos et on constate que l'électromyogramme est semblable à celui qu'on aurait obtenu par la position habituelle des électrodes.

L'expérience I permet de mettre en doute l'existence de l'équateur nerveux et l'expérience II montre que ce n'est pas le passage de l'onde contractile, tantôt sous l'une des électrodes, tantôt sous l'autre qui donne naissance à la variation négative.

Ceci étant, on sait que si on excite le nerf sciatique d'une grenouille, des courants d'action peuvent être recueillis au moyen d'électrodes placées sur le muscle gastrocnémien. Or, on peut formuler trois hypothèses sur l'origine de ces courants :

1° Le courant d'action enregistré est le courant d'ac-

tion du nerf qui se propagerait jusqu'aux électrodes de dérivation ;

2° Le courant d'action prend naissance aux plaques motrices ;

3° Le courant d'action résulte d'un processus électrique ayant le siège dans le tissu contractile lui-même.

La première hypothèse doit être rejetée, car les courants d'action du nerf sont d'un ordre de grandeur tout à fait différent de ceux qu'on enregistre en plaçant les électrodes au contact du muscle.

En faveur de la deuxième hypothèse, nous avons fait les expériences suivantes :

Expérience III. — Une grenouille est curarisée et on recueille l'électromyogramme en excitant le tronc du sciatique avec une onde faradique.

Quelques minutes après la curarisation, on ne constate pas de modification dans le tracé électrique, mais au bout de quinze à vingt minutes après le début de l'intoxication, l'excitation du sciatique, même avec un choc induit très fort, ne révèle aucune oscillation du galvanomètre (Fig. 6, III et IV).

Cette expérience est intéressante pour plusieurs raisons. Elle montre d'abord qu'en excitant le sciatique avec le courant faradique, toute oscillation indiquée par le galvanomètre n'est certainement pas due à une simple dérivation du courant excitateur.

D'autre part, elle montre qu'avec la paralysie de la plaque motrice, le courant d'action disparaît.

Sans doute, on ne peut pas, de cette expérience, conclure que le courant d'action prend naissance à la pla-

que motrice ; on peut objecter, en effet, que le tissu contractile ne s'est pas contracté, puisque l'excitation

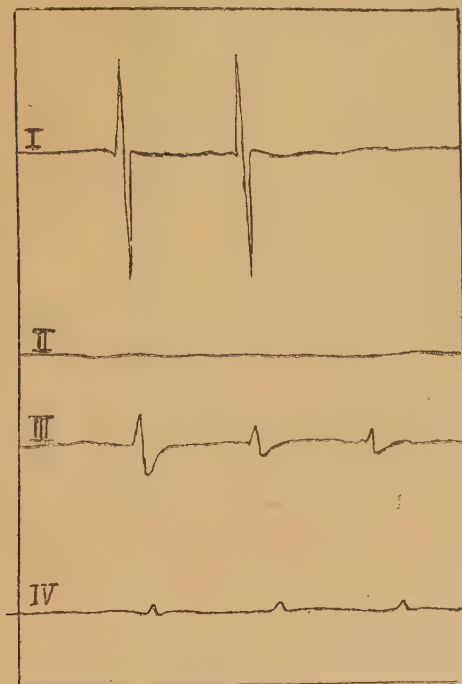


Fig. 6

n'a pas pu arriver jusqu'à lui et rien d'étonnant que le courant d'action ne soit pas apparu.

Nous avons alors réalisé sur l'homme les expériences suivantes :

Expérience IV. — Provoquons une fatigue des muscles fléchisseurs de l'avant-bras ; on constate que l'électromyogramme s'est manifestement modifié avec une diminution très marquée de l'amplitude et de la fréquence des oscillations (Fig. 9, III et Fig. 10). Or, dans cette

expérience, il s'agit également d'une atteinte physiologique des plaques motrices.

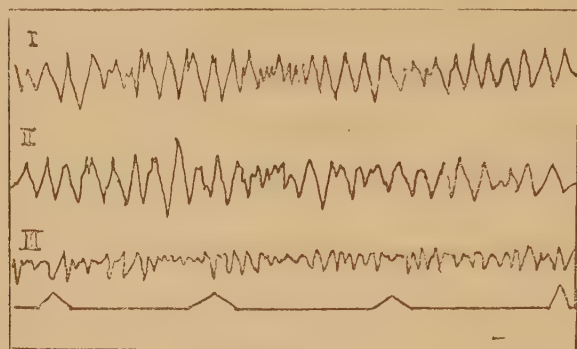


Fig. 9

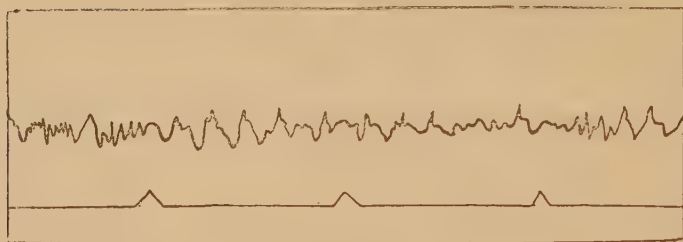


Fig. 10

Expérience V. — Faisons la contre-épreuve. Appliquons une bande d'Esmarch à l'avant-bras; nous produisons une anémie des muscles fléchisseurs de l'avant-bras et, par suite, une certaine modification dans l'état de la substance contractile elle-même, tout en respectant l'intégrité du système nerveux. Or, si dans ces conditions nous provoquons le tétanos volontaire, l'électromyogramme recueilli ne révèle pas de modifications avant ou après l'application de la bande d'Esmarch (Fig 9, I et II).

Ces deux expériences semblent nous autoriser de conclure que les courants d'action sont en relation intime avec l'intégrité des plaques motrices et indépendants de l'état de la substance contractile elle-même.

Bien plus, nous pouvons obtenir une contraction du tissu musculaire lui-même, sans pour cela voir apparaître un courant d'action.

Expérience VI. — Appliquons deux électrodes impolarisables sur le gastrocnémien d'une grenouille normale et excitons le tronc du sciatique avec un faible male puis excitons le tronc du sciatique avec un faible d'action (fig. 6, I). Si nous portons maintenant l'excitation avec la même intensité sur le tissu musculaire lui-même, nous ne recueillons aucun courant d'action (Fig. 6, II).

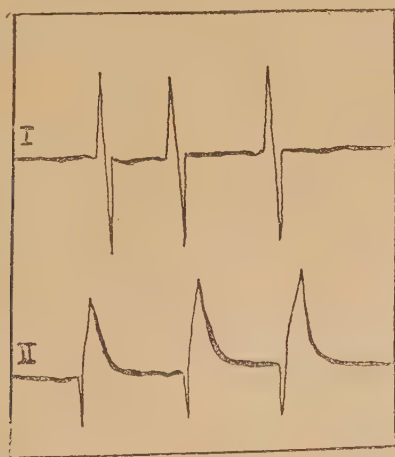


Fig 6

Expérience VII. — Augmentons l'intensité du courant

faradique et appliquons l'excitation toujours sur le tissu musculaire. Nous obtenons une onde diphasique, mais sans pouvoir affirmer si elle est due au courant d'action ou au courant dérivé excitateur. (Fig. 8, I et II).

Ainsi, sans même prendre parti pour telle ou telle préférence théorique, il est certain que l'excitation faite par l'intermédiaire du tronc nerveux donne un courant d'action beaucoup plus intense que celui obtenu par excitation directe du tissu musculaire lui-même, bien que dans ce deuxième cas l'excitation faradique soit produite très près des électrodes de dérivation.

Expérience VIII. — Les courants d'action issus des

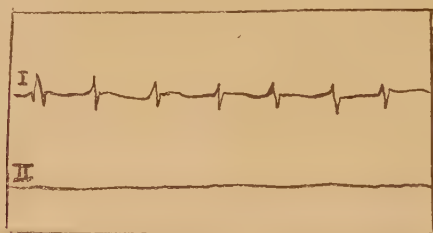


Fig 7

plaques motrices sont très intenses et peuvent être facilement recueillis même très loin de leur lieu d'origine.

Plongeons dans l'eau chaude le tiers inférieur d'un gastrocnémien d'une grenouille. Plaçons les électrodes sur cette partie du muscle qui a été échaudée et qui, naturellement, est désormais incapable de se contracter. Si, dans ces conditions, nous excitons le tronc du sciatique, nous recueillons cependant le courant d'action. Par contre, par excitation directe du tissu contractile, nous n'observons aucun courant d'action (Fig. 7, I et II).

Expérience IX. — Il est même possible d'observer des courants d'action assez intenses, en l'absence même de toute contraction musculaire apparente.

Au cours des expériences faites avec M. le Professeur Cluzet, sur la mort du cœur chez le chien, nous avons pu recueillir de nombreuses oscillations de l'électrocardiogramme, alors que le myocarde avait cessé de battre depuis quelques minutes.

V. — **Essai d'interprétation et Conclusions.** — Si l'équateur nerveux n'est qu'une fiction, si l'onde contractile n'est pas la cause, mais l'effet du courant d'action, comment expliquer cependant ces oscillations diphasiques indubitables qu'enregistre le galvanomètre?

Par les expériences précédentes, nous avons acquis la conviction du rôle prépondérant et presque exclusif qu'il convient d'attribuer aux plaques motrices. C'est à leur niveau que se passeraient les processus électriques les plus intenses, destinés à la formation du courant d'action.

Ainsi, si on pouvait isoler chacune de ces plaques terminales, on verrait que les alternatives de repos et d'excitation qu'elle subit se traduisent au galvanomètre par la présence d'une onde diphasique. De même, chaque oscillation de l'électromyogramme représenterait la résultante de ces phases d'excitation et de repos de l'ensemble de ces plaques motrices. De telle sorte, le tracé discontinu de l'électromyogramme serait la somme algébrique de toutes les variations électriques ayant leur siège au voisinage de ces éléments minuscules, intermédiaires entre les tissus nerveux et musculaire.

Comment, dès lors, en manière de synthèse, pouvons-nous concevoir l'électromyogramme ?

Supposons qu'une excitation de nature quelconque arrive au système nerveux, aussitôt prend naissance une onde électromagnétique. Certes, l'influx nerveux n'est pas un courant électrique, à n'en juger que par sa vitesse totalement différente. Mais les phénomènes biologiques nous ont habitué à ne comprendre leur activité, que par une série de transformations d'énergie et il n'est pas invraisemblable d'admettre que cette onde électromagnétique, se mutant de proche en proche et se propageant d'étape en étape à travers cellules, ganglions et filets nerveux, vienne aboutir aux plaques motrices, où elle explose enfin pour apparaître sous la forme d'un courant d'action.

Du reste, depuis l'encéphale jusqu'au muscle, toute une succession de barrages semblent retarder la progression de l'onde nerveuse, si bien qu'au terme de son parcours, à la plaque motrice même, on a pu mesurer le temps réfractaire de cet élément ultime. Henriquès et Lindhard ont trouvé que, pour une excitation dont la fréquence dépasse 250 à la seconde, la plaque motrice demeure silencieuse.

C'est dire que sa période réfractaire est de 0,004 de seconde et, si nous nous rapportons aux données relatives à la période latente de la contraction musculaire, qui est d'environ 0,01 seconde, on voit que c'est précisément dans cet intervalle de temps qu'apparaîtraient les processus électriques préparant les phénomènes mécaniques de la contraction musculaire.

Ainsi donc, le courant d'action enregistré par l'électro-

myogramme n'est pas un phénomène contemporain de la contraction musculaire, mais la précède en exprimant les modalités des excitations qui arrivent au muscle. Dès lors, il est possible, par l'étude du tracé électrique, par l'analyse de l'amplitude et de la fréquence des oscillations diphasiques, d'apprécier les impulsions nerveuses reçues par le muscle et de déceler, par la présence des anomalies, les divers troubles de la conduction neuro-musculaire.

CHAPITRE II

Les Applications cliniques de l'Electromyogramme

I. Le Tétanos volontaire. — Les Contractures. — La méthode électromyographique nous offrant un nouveau moyen d'investigation de la conduction nerveuse, il semble légitime de l'appliquer en neuropathologie. D'après ce qu'on sait sur le courant d'action en général, et d'après les recherches expérimentales de Fahrenkamp et de ses élèves, on peut s'attendre à trouver des modifications dans les tracés au cours d'une lésion du système nerveux central, du faisceau pyramidal ou du neurone moteur périphérique.

Nous ne possédons que très peu de documents relatifs à l'électromyogramme pathologique de l'homme.

Dittler et Gunther, puis Gregor et Schilder ont trouvé que dans l'ataxie progressive, l'électromyogramme présente une alternance d'oscillations très rapides et d'autres plus lentes, comme s'il existait des pauses ou de l'allongement des variations diphasiques.

Sur un avant-bras en contracture d'un hémiplégique, ces auteurs ont enregistré un tracé électrique, alors que le nombre était à l'état de repos.

Schäeffler et Weil ont montré, plus récemment, que tous les muscles, en général, qui sont en forte contracture sont capables de donner spontanément un courant d'action ; ces mêmes auteurs ont mis en évidence qu'au cas où la contracture est faible, il suffirait de provoquer l'extension passive du muscle pour enregistrer des oscillations diphasiques caractéristiques.

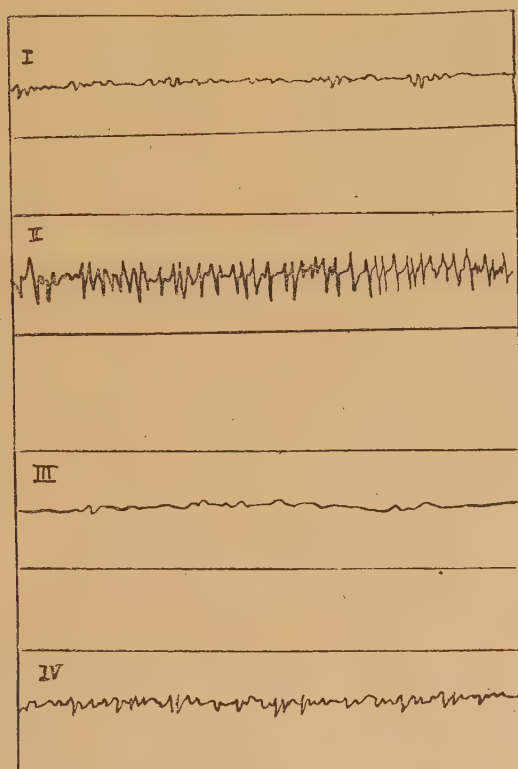


Fig 11

Avec M. le Professeur Cluzet, nous avons pu constater pendant la tétanisation volontaire des fléchisseurs de

l'avant-bras, diverses particularités dans quelques cas pathologiques :

1° Une polymiélite antérieure chronique (Service de M. Froment) avec atrophie musculaire myélopathique à marche progressive, nous présenta quelques oscillations très faibles, avec une fréquence de 10 à 15 par seconde (Fig. 11, I).

2° Une syringomyélie (Service de M. le Professeur Lépine) fut caractérisée par une diminution de l'amplitude et de la fréquence des oscillations (30 à 40 à la seconde). (Fig. 11, II).

3° Une myasthénie à forme Erb-Goldflam (Service de M. Gallavardin) eut un tracé marqué par de très longues pauses, interrompues seulement par quelques oscillations à la seconde (Fig. 11, III).

4° Un parkinsonien post-encéphalitique (Service de M. Froment) fut caractérisé par de petites oscillations de fréquence diminuée (40) et par l'existence de quelques pauses (Fig. 11, IV).

5° L'électromyogramme de la cuisse d'un hémiplé-

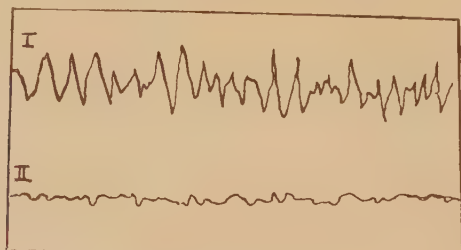


Fig 12

gique, à la période de contracture, nous révéla, du côté paralysé, une diminution notable de l'amplitude des oscillations par rapport au côté sain (Fig. 12).

II. Les Réflexes. — Les Clonus. — La méthode électromyographique a trouvé également une utilisation dans l'enregistrement des courants d'action obtenus au cours de divers réflexes tendineux ou de secousses musculaires.

Misch et Lotz trouvent que les tremblements choréiques, comme les tremblements cloniques post-hémiplégiques, sont caractérisés par une série d'oscillations qui sont analogues à ceux observés pendant le tétanos volontaire d'un muscle. D'après ces auteurs, ces mouvements pathologiques ne seraient que des tétanisations partielles.

Wertheim-Salomonsen arrive, par la méthode électro-



Fig 13

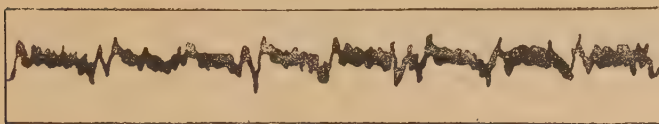


Fig 14

myographique, à faire le diagnostic entre un clonus organique et fonctionnel. Dans le cas d'organicité, à chaque secousse clonique, correspondraient 3 ou 4 oscillations diphasiques, mais, dans l'intervalle des clonus, on n'enregistre aucun accident dans le tracé. (Fig. 13). Dans le deuxième cas, il n'existe plus de phases de repos dans l'intervalle de deux secousses cloniques et le tracé présente, dans toute son étendue, de très fréquentes oscillations (Fig. 14).

Au cours d'un tremblement parkinsonien (Service de M. Froment), nous avons enregistré à la face antérieure de la cuisse, un train d'ondes diphasiques très allon-

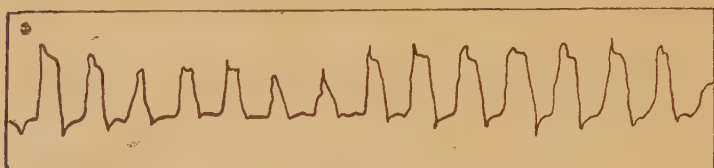


Fig 18

gées, ayant une fréquence parfois de $1/10^{\circ}$ de seconde (Fig. 18).

Chez un sujet normal, l'électromyogramme d'un réflexe patellaire est caractérisé par une seule onde diphasique de $1/50^{\circ}$ de seconde environ (Fig. 15). Il est certain qu'avec ce procédé on peut étudier, avec grande précision, le temps de latence nécessaire pour la forma-

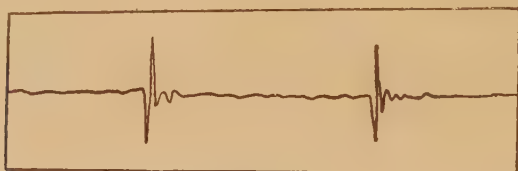


Fig 15

tion de cette onde, à la suite d'une percussion sur le tendon rotulien. Ce temps de latence varierait entre $1/50^{\circ}$ et $1/75^{\circ}$ de seconde (Fig. 16, d'après Hoffmann).

Le réflexe polycinétique est caractérisé par la présence d'une onde diphasique importante, suivie de 3 ou 4 oscillations d'amplitude plus faible.

Chez un syringomyélique (service de M. le P^r Lépine),

le réflexe patellaire nous a donné 3 ou 4 variations diphasiques (Fig. 17).

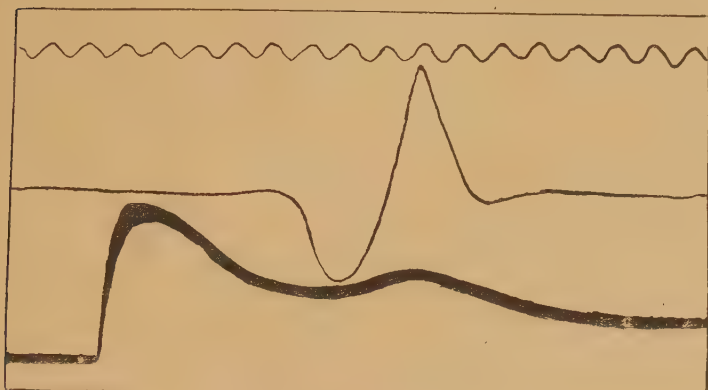


Fig 16

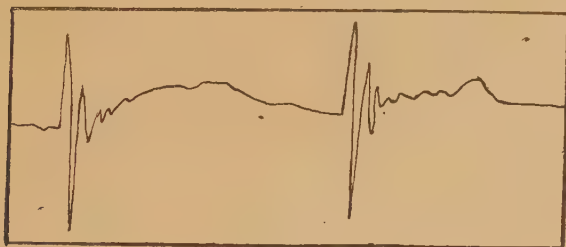


Fig 17

III. Valeur de la méthode électromyographique. — Certes, il est encore prématuré de vouloir attribuer à l'électromyogramme une valeur diagnostique ou pronostique. Cependant, comme cette méthode est la seule à notre connaissance susceptible de nous donner la mesure des impulsions nerveuses et de nous renseigner sur l'état de la conduction neuro-musculaire, toute anomalie dans le tracé doit éveiller notre attention sur un trouble existant dans le système nerveux. De même, la

méthode électromyographique permet de déceler, par une analyse très fine, les divers spasmes, même très légers.

Quant aux réflexes et aux trépidations épileptoïdes, la méthode est applicable pour contribuer à dissocier ceux qui sont de nature organique ou fonctionnelle (Wertheim-Salomonson).

Dans les affections nerveuses déjà constituées et à leur période d'état, les résultats sont encore peu nombreux pour apprécier par le seul aspect de l'amplitude et de la fréquence des oscillations, la gravité de l'atteinte de la conduction neuro-musculaire.

Nous citerons cependant un cas observé par nous dans le service de notre maître, M. Gallavardin, et qui nous a vivement impressionné :

Une jeune femme, atteinte de myasthénie à forme Erb-Goldflam se trouve, depuis dix-huit mois environ, dans un état stationnaire avec des alternatives de rémission ou d'aggravation des symptômes presque uniquement fonctionnels (perte des forces, fatiguabilité extrême pour marcher, parler, mastiquer, déglutir, lever les bras; léger ptosis des paupières; dyspnée).

L'électrodiagnostic des nerfs et des muscles ne révéla rien d'anormal; la réaction myasthénique de Joly fut négative.

Par contre, l'électromyogramme, des fléchisseurs de l'avant-bras fut caractérisé par la présence de quelques oscillations seulement (4 ou 6 par seconde), très faibles et très irrégulières, espacées par de longues pauses (Fig. 11, III). Nous étions, dès lors, en droit de conclure à l'existence d'un trouble certain et très grave, dans la

conductibilité et la propagation des impulsions nerveuses. Le pronostic devait être sombre et il a été du reste vérifié par une évolution très rapide.

CONCLUSIONS

I. — L'existence de phénomènes électriques, lors de la contraction volontaire des muscles, est un fait acquis en électrophysiologie, mais on n'est réduit qu'à des hypothèses quant à l'origine de ce potentiel électrique. Il semble cependant que les théories ioniques et électroniques soient actuellement les plus satisfaisantes pour concilier nos conceptions générales sur l'électricité avec le processus électro-biologique, le courant d'action n'étant qu'un signe révélateur d'une perturbation ionique ou électronique.

II. — Au cours de la téτανisation volontaire des muscles, il est possible d'enregistrer les courants d'action à l'aide du galvanomètre à corde et d'électrodes convenablement choisies pour être placées à même la peau, au voisinage des muscles dont on cherche à dériver les variations électriques.

III. — L'étude physio-pathologique de l'électromyogramme révèle, lors du téτανos volontaire des fléchisseurs de l'avant-bras, un tracé discontinu composé

généralement de 50 oscillations diphasiques à la seconde.

IV. — L'interprétation de l'électromyogramme, donnée par l'école de Piper, est basée sur ce fait que chacune des oscillations du tracé électromyographique présente une fréquence identique à celle obtenue par excitation directe du nerf au moyen d'un choc faradique. Le rythme spécial de l'électromyogramme serait la conséquence de la propagation de l'onde contractile.

V. — Pour des raisons expérimentales, il est plus rationnel d'admettre que les phénomènes électromoteurs précèdent les phénomènes mécaniques.

Le courant d'action n'est que le reflet d'une excitation physiologique et l'électromyogramme représente non pas une propriété du tissu contractile, mais les modalités des excitations provenant du système nerveux et aboutissant à la plaque motrice.

L'électromyogramme serait une méthode de mesure de la dynamique nerveuse et nous permettrait d'analyser l'état de la conduction neuro-musculaire.

VI. — On ne peut actuellement songer à établir une relation définitive entre les modifications observées dans les tracés électromyographiques et les différents états pathologiques. Cependant, bien que tous les phénomènes ne soient pas complètement élucidés, on peut, par l'étude du rythme et de l'amplitude de ses oscillations, apprécier les divers troubles de la conduction nerveuse.

Toute lésion du système nerveux, depuis l'encéphale jusqu'à la plaque motrice inclusivement, se traduit dans l'électromyogramme par des modifications de la fréquence et de l'amplitude des oscillations diphasiques.

VII. — Les spasmes, les contractures, les clonus, les réflexes nous ont donné des tracés électriques assez caractéristiques pour nous permettre de faire une classification correspondant aux divers états pathologiques et contribuer ainsi à l'institution d'un pronostic et d'un traitement rationnel.

Vu :

LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE,
J. CLUZET.

Vu :

LE DOYEN,
JEAN LEPINE.

Vu et permis d'imprimer :

Lyon, le 3 Mai 1922.

LE RECTEUR,
PRÉSIDENT DU CONSEIL DE L'UNIVERSITÉ,
P. JOUBIN.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie Expérimentale

- D'ARSONVAL. — Production d'électricité chez l'homme (*B. B.*, 14 janv. 1888).
- BAYLISS et STARLING. — On the electromotiv phenonom of mammalian heart (*Int. Mon. f. Anat. et Phys.* V, IX, p. 1892).
- BAYLISS. — Principles of gener. physiolog., 1918.
- J. BOECKE. — Beitrage z. Kenntuiss des Motorischen Nervenendigung (*Monatsch. f. Anat. et Physiol.*).
- BERNSTEIN. — Bases électrochimiques du potentiel bio-électrique (*Bioch. Zeitz.*, 1913, p. 393).
- S. DE BOER. — Electromyogramme des muscles vératrinisés (*Z. f. Biologie*, V. 61, p. 143).
- BORUTTAU. — Action des ions anorganiques sur le courant d'action (*C. Blat. f. Physiol.*, 1916, p. 1).
- BURCH. — On a method of determing the value of rapid variation of a difference of potential by means (*Proc. Roy. Soc.*, 1890, p. 89).
- BUCHANAN. — The electrical response of muscle to voluntary reflex (*Quaterly J. of. experim. Physiol.*, V. I).
- CYBULSKI. — Recherches sur la théorie des phénomènes électriques chez les êtres vivants (*C. R. acad. de Cracovie*, mai 1898).
- Les courants électriques dans les muscles altérés et non altérés à leur origine (*Arch. int. de phys.*, V. II, p. 418).
- CZAGOWEC. — Newrologuitcheski Viestnik, 1898, p. 173.
- EINTHOVEN. — Explication de l'électrocardiogramme (*Arch. Neerland.*, 1917, p. 109).
- Un nouveau galvanomètre (*Arch. Neerland.*, V. 6, p. 625).

- ENGELMANN. — Vergleichende untersuchungen z. Lehre der Muskel und Nerven elektrizität (*Pflug. Arch.*, 15, 1877).
- FAHRENKAMPF. — Courants d'action au cours de la tétanisation par la strychnine (*Z. f. Biologie*, 1915, p. 79).
- FUNKE. — Courants d'action des muscles lisses (*Arch. Neerland.*, 1921, p. 198).
- GARTEN. — La production d'électricité animale (*Winterst Physiol.*, 3, p. 105).
- GIRARD. — L'osmose électrique (*J. de Ch. Physique*, 1919).
- HENRIQUES et LINDHARD. — Les courants d'action des muscles striés (*Pflug. Arch.*, 1920, V. 183, p. 1).
- HERMANN. — Handbuch der Physiologie, 1879.
- HOBER. — Expériences pour la démonstration des courants d'action (*Pflug. Arch.*, 1919, p. 305).
- HOFFMANN. — Connaissances sur le réflexe humain (*Arch. f. Anat. et Pys.*, 1909, p. 223).
- HOEBER. — Physikalische Chemie der zelle, 1913.
- LEWIS-MARGARET. — Rhythmical contraction of the skeletal Muscle (*Americ. Jh. of Physiologie*, 1915, p. 153).
- MINES. — On functional analyse by the action electrolyte *J. of Physiologie*, 46, 1913).
- NERNST. — Theorie der diffusion (*Zt. phys. chimie*, 1888, p. 613).
— Théorie de l'excitation électrique (*Math. Phys.*, 1899, p. 104).
- NOYON. — Sur l'autotonus musculaire (*Arch. f. Physiol.*, 1910, p. 319).
- OSTWALD. — Uber dissocianttheorie der Electrolyte (*Zeit. de Chimie physik.*, 1888, p. 270).
- OTTO V. FURTH. — La Chimie colloïdale du muscle (*Erg. der Physiol.*, 1919, p. 510).
- PERRIN. — Mécanisme de l'électrisation de contact et solutions colloïdales (*J. Ch. Physique*, 1904, p. 601).
- PAULI. — Dépendances des phénom. électriques, mécaniques et chimiques dans le muscle (*Kolloidch. Beiheft.*, III, 361).
- PIPER. — Rhythmik Innervations impulse (*Zeit. f. Biologie*, V. 53).
— Elektrophysiologie menschlichen Muskeln, 1912.
— Théorie des Elektromyogramm (*Pflug. Arch.*, V. 129).
— Courants d'action des muscles de l'avant-bras (*Arch. f. Anat. et Physiol.*, 1914, p. 345).

- TRENDLENBURG. — Méthode de recherche des courants d'action
Z. f. Biol., 1921, p. 113).
- TSCHERMAK. — Biolektrische Sutren au Magenmuskulatur (*Pf.
Arch.*, 175, p. 1919).
- TSCHIRJEW. — Phénomènes électriques dans les muscles (*Arch.
f. Physiol.*, 1913).
- VERZAR. — Les échanges gazeux dans les muscles (*Erg. der
Physiol.*, 1916, p. 93).
- YEO AND CASH. — On the relation between the active phases of
contraction and the latent period (*The J. Physiol.*, V. 4,
p. 198).

Bibliographie Clinique

- CLUZET et KOFMAN. — Electromyogramme et son utilisation en
clinique (*Soc. Méd. Hôpit. Lyon*, 23 février 1922).
- DITTLER et GUNTHER. — Courants d'action chez l'homme normal
et pathologique (*Arch. f. d. ges. Physiol.*, V. 155, p. 251).
- GREGOR et SCHILDER. — Etude des muscles avec le galvanomètre
à corde (*Munch. Med. Woch.*, 1912, N° 52, p. 2850).
- Contribution à la connaissance de la physiologie et de
la pathologie de l'innervation musculaire. (*Zeit. f. d. ges.
Neurol.*, 1913, V. 14, p. 359).
- MEYER et SPIEGEL. — Recherches expérimentales sur les con-
tractures musculaires (*D. Zeit. f. Chir.*, V. 162, 1921,
p. 145).
- MISCH et LOTZ. — Courants d'action dans les maladies organi-
ques et fonctionnelles du système nerveux central (*Mo-
natschrift f. Psy. et Neurol.*, V. 36, p. 191).
- REHN. — Courants d'action en pathologie (*Dt. Z. f. Chir.* V. 162,
1921).
- SAMKOW. — Courants d'action dans quelques cas pathologiques
du système nerveux (*Arch. f. gyn. Physiol.* V. 149, p. 588.)
- SCHAEFFER. — Contribution à l'innervation autonome des muscles
(*Pflug. Arch.*, V. 185, 1920, p. 42).
- SCHAEFFER et WEIL. — Recherches électrographiques sur les spas-
mes musculaires (*Mittellungen a. Grenzgeb. d. Medizin*,
1921, p. 393).
- WERTHEIM-SALOMOSON. — Clonus of organic and functional ori-
gin (*Fol. neurobiol.*, V. 4, p. 1).

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION.....	11

Première Partie

Origine du Potentiel Electrique dans les Muscles

CHAPITRE I.

I. Théorie électro-moléculaire de Dubois-Reymond	13
II. Théorie de l'altération de Hermann.....	14
III. Théories ioniques.....	15
IV. Théorie électronique.....	20
V. Conclusions.....	21

CHAPITRE II.

Enregistrement du courant d'action musculaire

I. Généralités.....	23
II. Choix d'électrodes	24
III. Conditions expérimentales pour l'enregistrement des courants d'action	26

Deuxième Partie

Etude Physio-Pathologique des Electromyogrammes

CHAPITRE I.

I. Le Photogramme électrique normal.....	31
II. Interprétation de l'Electromyogramme (Théorie de Piper)	32
III. Objections à l'interprétation de Piper	36
IV. Essai expérimental pour l'interprétation de l'élec- tromyogramme	38
V. Essai d'interprétation et conclusions	45

CHAPITRE II.

I. Le Tétanos volontaire - les Contractures	48
II. Les Réflexes - Les Clonus.....	51
III. Valeur de la méthode électromyographique.....	53

CONCLUSIONS.....	57
------------------	----

BIBLIOGRAPHIE	61
---------------------	----

ERRATUM

Page 43 : *Expérience VI*, lire :

Expérience VI. — Appliquons aux électrodes impolarisables sur le gastrocnémien d'une grenouille normale puis excitons le tronc du sciatique avec un faible choc faradique, juste suffisant pour déceler le courant d'action (fig. 6, I). Si nous portons maintenant l'excitation avec la même intensité sur le tissu musculaire lui-même, nous ne recueillons aucun courant d'action (Fig. 6, II).

